

磁放大器

苏联 M. A. 罗津布拉特著

李鹤龄译

人民邮电出版社

苏联
无线电技术
杂志

73.45573
250
02

目 录

3478/08

第一章 緒 論

- § 1 磁放大器的前期歷史..... (1)
- § 2 由两个变压器做成的最简单的磁放大器..... (3)
- § 3 磁放大器是一个调制器..... (6)
- § 4 磁放大器的应用范围和目前的发展情况..... (8)

第二章 磁放大器所用的铁磁材料和半导体整流器

- § 5 铁磁..... (10)
- § 6 铁磁合金..... (13)
- § 7 铁氧磁物..... (18)
- § 8 半导体整流器..... (19)

第三章 无反饋的磁放大器

- § 9 两种类型的單臂磁放大器..... (22)
- § 10 关于磁学量和电学量两者之间的关系..... (25)
- § 11 理想的磁放大器和它的特性..... (33)
- § 12 理想磁放大器的时间常数和频率特性..... (41)
- § 13 实际磁放大器的特性曲线..... (43)

第四章 有反饋的磁放大器

- § 14 外部反饋..... (45)
- § 15 有反饋的理想磁放大器的性能..... (47)
- § 16 有外部正反饋的实际磁放大器的特性曲线..... (50)
- § 17 有内部反饋的磁放大器..... (54)

- § 18 磁帶綫的形狀對反饋磁放大器負載特性曲綫的影響..... (57)
- § 19 電感性負載對反饋系數的影響..... (61)
- § 20 變更內部反饋放大器的反饋系數的方法..... (62)
- § 21 當作繼電器用的磁放大器..... (65)

第五章 推挽式和多級的磁放大器

- § 22 載波頻率輸出的磁放大器..... (72)
- § 23 直流輸出的推挽式磁放大器..... (79)
- § 24 電壓磁放大器和磁調制器..... (83)
- § 25 倍頻磁放大器和磁調制器..... (85)
- § 26 多級磁放大器..... (87)

第六章 快速和高頻磁放大器

- § 27 減低磁放大器的慣性的主要方法..... (91)
- § 28 聲頻和高頻的磁放大器..... (95)

第七章 怎樣製造磁放大器

- § 29 磁鐵合金的選擇以及鉄心和綫卷的構造..... (100)
- § 30 磁放大器工作狀態的選擇..... (104)
- § 31 在鉄心已經選定的情況下如何求出它的綫卷數據..... (107)
- § 32 用現成的變壓器來做磁放大器..... (114)
- § 33 具有高導磁率鉄心的單臂磁放大器的簡化計算..... (116)
- § 34 磁放大器的調整..... (121)
- § 35 從試樣的實驗結果來確定磁放大器的結構參數和綫卷數據..... (126)

第八章 磁放大器的幾個應用實例

- § 36 用磁放大器做穩壓器..... (130)
- § 37 用磁放大器作電機的調節和控制..... (132)
- § 38 磁放大器在自動警報、自動保護和自動控制設備中的應用..... (134)
- § 39 磁放大器在測量技術中的應用..... (136)

第一章 緒論

§ 1. 磁放大器的前期歷史

顧名思義，可知磁放大器的作用原理是以利用鐵磁物質的特性為基礎的。假設有一個環形鐵心，在上面繞上 w 匝線卷（圖 1）。如果使這個線卷通過一個電流 i ，就會產生一個磁場，這個磁場的強度為

$$H = \frac{0.4\pi iw}{l}, \quad (1)$$

H 的單位是奧斯特。式中 l 是鐵心的平均長度，單位是厘米。

在這個磁場作用之下，鐵心就給磁化了，鐵心裏面就產生了磁通量 Φ 。每一個平方厘米的鐵心截面所通過的磁通量就是磁通

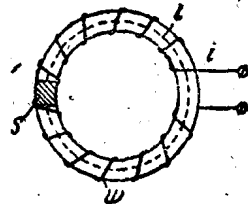


圖 1. 有激磁線卷的環形鐵心

量密度，稱它為磁感應強度並以字母 B 來表示。磁感應強度是用高斯做單位的。如果鐵心的截面積等於 S ，就可以用公式

$$\Phi = BS \quad (2)$$

來計算這個面積的磁通量。

磁感應強度 B 對磁場強度 H 之比稱為鐵心的或物質的導磁率 μ ：

$$\mu = \frac{B}{H}.$$

(3)

表示磁感应强度 B 对磁场强度 H 之间关系的曲线称为**磁化曲线**。

过去有过很长时间，人们总认为铁和铁的合金在磁方面的特性，其中如导磁率 μ ，是和磁化磁场的强弱无关的。后来 A. J. 斯托列托夫 (1871 年) 才第一个发现铁的主要磁性，并对这些特性作了详细的研究。斯托列托夫所提出的意见，正好同当时所公认的见解相反，他认为磁通量 Φ 在闭合铁心里的变化不是和磁化磁场的强度 H 成正比的，而是 H 的非线性函数。根据这一点推出，铁的导磁率 μ 自然也不是一个常数而是和磁化磁场的强度 H 的大小有关了。假如 H 的数值相当大，磁铁就会达到饱和，而导磁率就急剧地下降。要是再继续提高磁化磁场的强度 H ，导磁率 μ 就趋近于它的一个极限值，这个极限值等于空气的导磁率 (1 高斯/奥斯特)。

闭口铁心的磁化曲线和导磁率对磁场强度的关系曲线如图

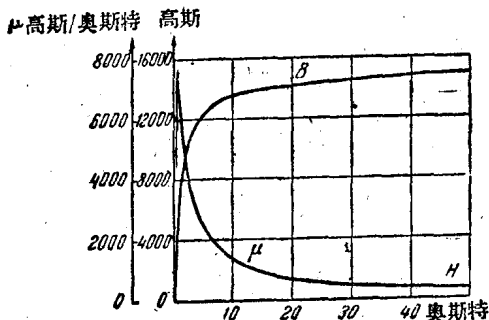


图 2. 铁的磁性

B —磁化曲线； μ —表示导磁率与磁场强度间关系的曲线。

2 所示。磁感应强度 B 与磁场强度 H 的非线性关系，因而导磁率与磁场强度的非线性关系不但在铁里也可以发现，就是在许多铁的合金，甚至在某些不包含铁的合金也可以发现。所有这些合金都称它为**铁磁物质**。

铁磁材料的磁化曲线的这种非线性特性是由斯托列托夫最早发现的，毫无例外地，一切磁放大器的作用原理都以这种特性为基础。

$H \cdot H$ 亚布洛奇柯夫在 1876 年就最先发明了变压器。但是在沙皇俄国的社会里，如同其它司空见惯的事情一样，这一项对电工学以后发展极为重要的伟大发明不久也就湮没无闻了。1882 年，变压器第二次被 $H \cdot \Phi$ 乌沙金所发明，这次发明与亚布洛奇柯夫的第一次发明完全无关。

由于斯托列托夫发现和研究了铁的磁性以及亚布洛奇柯夫和乌沙金先后发明了变压器，就为磁放大器的创造打下了基础。实际上，从它的本质来说，一个最简单的磁放大器不外是两个变压器，只是这两个变压器的铁心是闭口的，并且做铁心的铁磁材料具有非直线性的磁化曲线而已。

§ 2. 由两个变压器做成的最简单的磁放大器

有两个同样的变压器，我们将它的初级线圈 w_1 串联起来，并且接到电压为 U 的交流电源上面（图 3）。当次级线圈 w_2 开路时，变压器的初级线圈里就只有空载电流 $I_{x.x}$ 通过。假如将两个次级线圈 w_2 方向相反地串联起来，那么两个次级线圈所感应的电动势在数值上彼此相等，而在相位上彼此相反，因而互

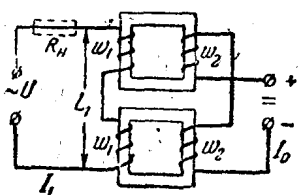


圖 3. 用兩個變壓器做成的
最簡單的磁放大器

相抵銷，次級電路的總電動勢就等於零。這樣一來，即使將次級繞卷的兩個空閒接頭接成短路，也不會有電流在這兩個繞卷 w_2 中流過，初級繞卷的電流也不會因此而改變。

現在我們把一個直流電流 I_0 送入這兩個變壓器的次級繞卷 w_2 。由於鐵心的磁化曲線是非直線性的，所以這個電流就使鐵心的動態（或有效）導磁率 $\mu_{\sim}$ ，即交變磁通量的導磁率減小。初級繞卷的電感 L_1 因而減小，電感 L_1 和動態導磁率 $\mu_{\sim}$ 之間有着如下式所示的關係。

$$L_1 = 2 \frac{0.4\pi w_1^2 S}{l \cdot 10^8} \mu_{\sim}, \quad (4)$$

式中 L_1 是初級繞卷的電感，單位是亨利； S 是每個鐵心的截面積，單位是平方厘米； l 是每個鐵心的平均長度，單位是厘米。

隨着電感 L_1 的減小，初級繞卷的電流 I_1 就增大了。電流的大小可以用下列大家所熟悉的公式來確定：

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L_1^2}}. \quad (5)$$

式中： R ——初級電路的電阻，單位是歐姆。

圖 3 所示的裝置通常稱它為飽和扼流圈或控制扼流圈，因為它是利用直流電來將鐵心磁化，使鐵心的飽和程度改變，所以繞卷 w_1 的電感可以在很寬的範圍內變動。

如果將如圖 3 虛線所示的負載 R_N 同繞卷 w_1 串聯，則得出一

个最简单的磁放大器。我们之所以称它做放大器，是因为它可以用很小的直流功率来控制负载电路内很大的交流功率，直流功率就是消耗在控制线圈 w_2 的电阻上面的功率。

利用固定磁通量可以使铁心发生饱和，磁放大器的作用原理就是以这一种现象为基础，而在输出变压器中，这一类现象通常是要加以抑制的。

当输出变压器有直流电激磁的时候，为了防止 μ 降低，它的铁心里需要有一个空气隙，以便使直流电的磁化磁场减弱。表示变压器初级线圈的电感 L_1 与屏极电流 I_0 的直流成份间关系的特性曲线如图4所示：曲线I指铁心是III形时的情况，铁心的铜片是交替迭合；曲线II也是用同样的铁心，但铜片是同向迭合；曲线III是用有0.5毫米宽空隙的III形铁心时得出的曲线；IV一用环形铁心时取得的曲线。

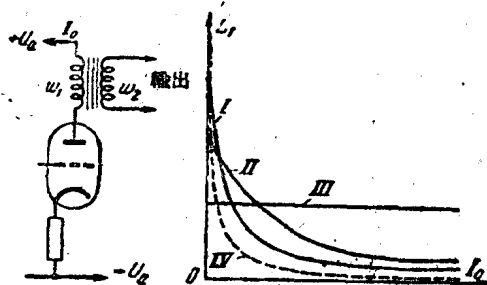


图4. 变压器初级线圈 w_1 的电感与屏极电流 I_0 的直流成份间的关系曲线
I—用交替迭合铜片的III形铁心时得出的曲线；II—用铜片同向迭合而成的III形铁心时得出的曲线；III—用有0.5毫米宽空隙的III形铁心时得出的曲线；IV—用环形铁心时取得的曲线。

迭合，曲线III所用的铁心大约有0.5毫米宽的空气隙。曲线IV（虚线）是指用环形铁心时电感变化的情况。

由上图可明显看出，从改善图4输出变压器工作的观点看来是有利的措施，要是硬搬过来用之于磁放大器，就会将磁放

大器的工作搞坏。

所以，磁放大器的铁心决不允许有空气隙，这一点是特别重要的。一个铁心有这样的空气隙，它就会使总导磁率降低并且使磁化曲线变直，这一点 A. П. 斯托列托夫早就已经指出了。他还证明，采用环形铁心时（见图 1），最能充分利用铁磁材料的磁化曲线的非直线性特点。

§ 3. 磁放大器是一个调制器

电子管放大器的等值电路如图 5, a 所示，图 5, b 是最简单的磁放大器的等值电路。电子管放大器的作用原理如下：先将一个

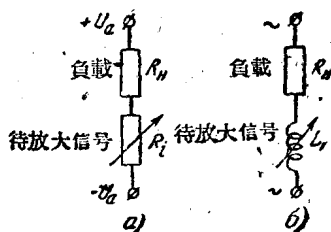


图 5. 等值电路

a—电子管放大器；b—磁放大器。

一个负载电阻 R_n 同电子管串联，然后接入电源，放大时，将要放大的信号加在电子管的栅极上，使电子管的屏路电阻 R_t 改变，因而使流过电阻 R_n 的电流 I_a 也跟着改变。电子管放大器负载电路的电源一般都采用直流。

磁放大器（图 5, b）的负载电阻 R_n 是同电感 L_t 串联的，放大时，被放大的信号使电感 L_t 改变。为了使电感的变化能够对负载电流的数值产生影响，磁放大器的负载电路就不得不由交流电源来供电了。

为着简单起见，到现在为止我们还是假定磁放大器的输入信号是直流信号。其实磁放大器也可以用来放大交流信号。从本质上来说，磁放大器不过是一个调制器，它的负载电流就是

經過信號調制的“高”頻電流。因此為了使磁放大器的輸出負載電流在波形上同所放大的信號一樣，就必須在輸出端裝一個反調制器，就是在聯接負載之前要先接一個檢波器或整流器。同時，也象採用調幅的普通無線電設備一樣，電源的頻率（載波頻率）最低限度應為被放大信號（調制信號——譯註）的最高頻率的5—10倍。

圖6, a 畫出一個負載電流的檢波電路，這種電路為用來放大直流電流和放大變化很慢的電流的磁放大器所常採用。以後用 $w_{\sim}$ 來表示接在負載電路中的交流繞卷，而待放大信號所通過的控制繞卷則用 w_y 來表示。

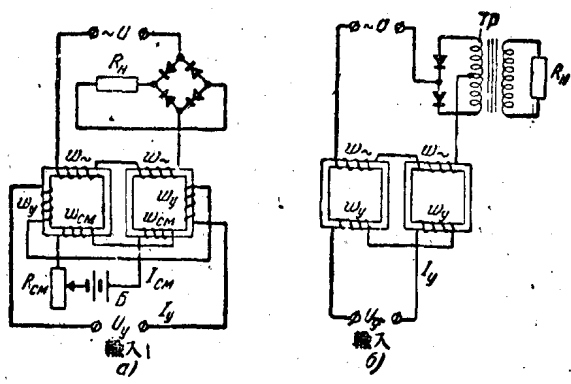


圖 6. 有載波頻率整流的磁放大器
a—有橋式整流器的放大器；b—依照申費爾式線路聯接的放大器。

用於低頻的整流器通常用矽或氧化銅做的，鎢整流器則在高頻方面應用。圖6, a 電路所示的放大器，還加多了兩個偏移繞卷 w_{CN} 。利用偏移電流 I_{CN} 通過這兩個繞卷，就可以在磁放大器的特性曲線上選擇合宜的工作點。在圖示的電路中，偏移繞

卷是由電池 B 來供电的。通常总附加一个硒整流器，把交流市电整流为直流供作偏移綫卷的电源。

远在1920年， $R. H.$ 申費尔就設計了一个磁放大器的綫路，用来作声頻微音器电流的放大，这个綫路如图 6, 6 所示。因为这个綫路裝了一个輸出变压器 Tp ，而 Tp 又可以用来消除輸出电流的直流成份，所以这个綫路只用两个整流元件就可以得到全波整流。

§ 4. 磁放大器的应用范围和目前的发展情况

只要將圖 5 所示的那两种放大器的等值电路作一比較，就不难对于磁放大器的优点和缺点預先作出一些結論。首先指出，磁放大器用的一切元件，包括半導體整流器（硒質的、氧化銅的和鍍質的整流器）在內，它們的特点是寿命都較長，能够容許相当大的过载，而且不怕振动和顛簸。因此磁放大器的特点就是工作非常可靠。它不需要經常的檢查和維護，而且在有火災危險和有爆炸危險的地方也可以使用。同电子管放大器不同，磁放大器不須要預先加热，接通电源之后可以立刻工作。因为磁放大器是利用电感的变更來改变它的負載电流的，而电感所“消耗”的功率又主要是无功功率，所以磁放大器的另一个特点是它的效率比电子管放大器高得多。除此之外，磁放大器沒有灯絲电路，所以沒有这方面的能量損失。

用来放大直流电流和变化很慢的电流的磁放大器，它的主要优点是可以直接利用交流市电來供电。至于用于声頻的磁放大器，因为所需的电源頻率还要比声頻高，所以在这方面有些

缺点。因此，放大直流电流和放大变化很慢的电流的磁放大器首先獲得广泛应用。

同电子管放大器一样，磁放大器也可以使用反饋电路，多級电路和推挽式电路。如果多装几个控制綫卷，就可以做成一种磁放大器，它的作用相当于多極的电子管。同时磁放大器控制綫卷的数目可能远多于电子管柵極的数目，某些磁放大器的控制綫卷竟多到10—20个。这一类磁放大器可用來將各种不同信号綜合起來。

磁放大器的另一个优点是它的穩定度高，当电源的电压和电源的頻率在額定值的 $\pm 20-30\%$ 的範圍內漲落时，它还能够穩定地工作。此外它又能够保證得到相当高的功率放大，每級可以达到 10^5-10^6 。应用專門的电压磁放大器（磁調制器），可以放大功率弱到只有 $10^{-12}-10^{-17}$ 瓦的直流信号。

由于磁放大器有着上述的許多优点，所以它就首先在自动調節、自动操縱和自动控制的設備中得到广泛使用。磁放大器可以用在电压、頻率、轉速、溫度和压力等的調節器里，以及用在測量技术方面——用在待測参量的自动补偿綫路中。它也可以用來放大微弱的热电动势、光电电流和应变机發送器的信号，以及用作零点指示器等等。磁放大器在随动系統中可用來控制直流电动机和交流电动机，它也用來控制閘流管的点火角、固体整流器和旋轉着的發电机。在繼电保护裝置和警报綫路、自动分揀机、計数机和計算仪器、自动駕駛和其他設備中也都用得到磁放大器。电压穩定器，特別是用來供給电子仪器的穩压裝置就广泛地采用磁放大器。

磁放大器的時間常數（慣性）是由控制綫卷的電感所產生的，這個時間常數比電子管放大器的時間常數大得多，這是磁放大器的一个最重大的缺點。由於這個緣故，很久以來，人們都認為磁放大器只適宜於作直流電流的放大和變化很慢的電流信號的放大。但是自從新的高質磁合金和新的磁放大器的綫路產生以後，在規定的放大系數之下可以大大減低它的慣性。雖然磁放大器目前的主要應用領域仍然是用來放大直流電流和變化很慢的電流，但是首先因為它是非常可靠，所以最近在音頻方面，甚至在更高的頻率範圍方面，以及脈沖技術中，磁放大器的應用越來越廣泛。

磁放大器這一門技術，目前正在蓬勃地發展。放大器本身正在迅速地做得日臻完善而它的使用範圍也與日俱增。在放大直流電流和變化很慢的電流這一方面，磁放大器已經在開始越來越多地排擠着電子管放大器。應當指出，電子管放大器的特性和磁放大器的特性各有千秋，彼此相輔為用往往會成效卓著，因此將兩種放大器配合使用往往是解決問題的最好辦法。

第 二 章

磁放大器所用的鐵磁材料和半導體整流器

§5. 鐵 磁

前經指出，鐵磁材料的特性可以用它的導磁率與磁場強度間的關係曲線來表明。為了簡單起見，現在我們暫且假定表明磁感應強度 B 與磁場強度 H 關係的曲線是單值的，而且是一根

曲綫（圖 2 的磁化曲綫）。實際上在同一个磁場強度 H 作用之下，鐵磁材料的磁感應強度的數值可能是不同的，需視該材料過去的磁化情況而定。

我們現在來研究鐵磁物質的磁化過程。假定物質開頭是完全去磁的，如果加強磁場強度 H ，磁感應 B 起先增加得很快（圖 7）。當強度 H 的數值相當大的時候，物質的磁狀態就接近飽和，而磁感應 B 的增長速度就慢下來了。

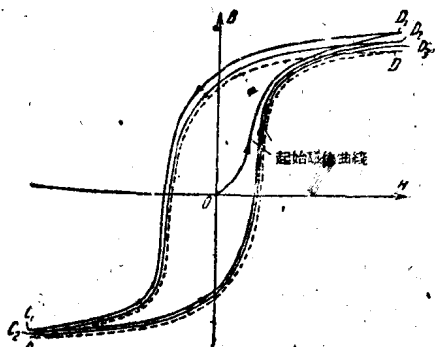


圖 7. 使業經去磁的鐵磁物質循環反復磁化的磁滯曲綫

如果物質業經去磁，當磁場強度增大時，磁感應的增加規律如曲綫 OD_1 （圖 7）所示， OD_1 稱為起始磁化曲綫。

如果將磁場強度調節到某個最大值 $+H_m$ （圖 7 的 D_1 點）之後即行降低，則磁感應將沿一條新的曲綫 D_1C_1 變化，曲綫 D_1C_1 在起始磁化曲綫之上。當 H 的數值降低到零，磁感應却未變到零，而保存了某一個正值，這個正值稱為剩磁 B_r 。如果要使磁感應變到等於零，就要使磁場強度變到一個負值，這一個負值稱為矯頑力 H_c 。如果調節 H 到負值 $-H_m$ ，它的絕對值等於正最大值，則磁感應的值將為負，相當於點 C_1 。重新加大磁場強度到 $+H_m$ ，又可以得到一條新的支綫 C_1D_2 。因為曲綫 OD_1 是由原點開始，而曲綫 C_1D_2 是從有較大負值剩磁的情況下開始的，

所以点 D_2 稍許在点 D_1 之下。曲綫 D_2C_2 ，曲綫 C_2D_3 分別相当于場强 H 第二次減少，以及再度增加所得的結果。

所以在磁場强度固定的情况下，磁感应的大小，就同磁化的过程有关了。这种現象，称为**磁滯現象**，只有經過多次反复磁化(大約十次)之后，才会得到一个对称的磁滯循环(CD)，如圖 7 的虛綫所示。

用不同的 H_m 值求得的对称磁滯循环(回綫)族，如圖 8 所示。如果某一个 H_m 的数值已經相当大，足以使物質接近飽和状态的話，那么即使从这一点开始繼續加大 H_m ，也不能使磁滯回綫所包含的面積有所增大。相当于这个 H_m 数值的磁滯回綫(循环)称为**極限磁滯回綫**，物質的磁状态总是用某一点(B, H)來表示的，这一点位在極限磁滯回綫之內。

联結各对称磁滯回綫的頂点所作成的曲綫称为**基本磁化曲綫**。基本磁化曲綫一般系用直流电來激磁求出的，而表明鉄磁物質磁性的導磁率 μ 則通常由这个曲綫來決定。如果用剩磁 B_r 和矯頑力 H_c 这两个数值來表示鉄磁物質的磁性，則这两个数据要由極限的对称磁滯回綫(圖 8)求出。

將鉄磁材料按矯頑力 H_c 的大小分为軟性的和硬性的兩種。磁放大器鉄心的材料一概用軟磁材料，这种材料的矯頑力 H_c 通常都少于 1 奧斯特。

鑑于作用着在磁放大器鉄心里的磁場强度，其大小一般都是矯頑力的十倍甚至百倍以上，所以在分析磁放大器的工作以及作磁放大器的計算时，就常常可以忽略磁滯現象，而用一条由極限磁滯回綫的上升支綫和下降支綫的平均值作成的曲綫來代

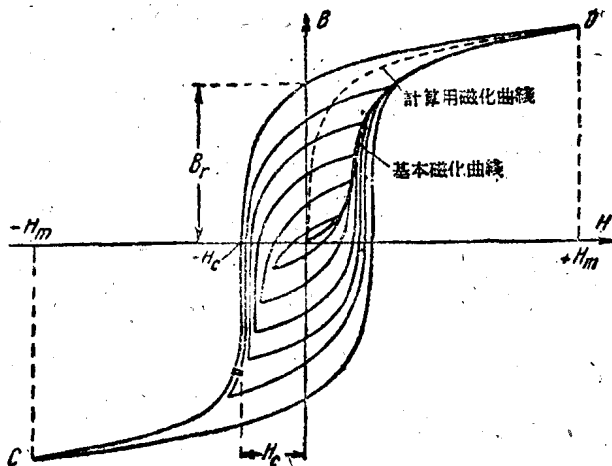


圖 8. 对称的磁滞回线族

替極限磁滯回綫。这一条平均曲綫如圖 8 中的虛綫所示，今后則称它为計算用的磁化曲綫。以后分析磁放大器的工作时，我們一律使用計算用的磁化曲綫，并且只有在磁滯回綫的形狀对磁放大器的性能發生嚴重影响时才考虑这种磁滯現象。

§ 6. 鉄磁合金

苏联的工厂出產了为数極多的軟磁性材料，适用于各种磁放大器，这些材料可以分为三大类，第一类为电气鋼，这是一些鉄和硅的合金。属于这一类的有 33、33A、34、34A 和 34AA 型变压器鋼，这些鋼材可用來做变压器以及低頻扼流圈的鉄心，在无线电技术部門中应用很广泛。BП-1、BП-2 和 BП-3 型的热軋鋼片質量較高（縱使磁場微弱，導磁率也很高；損耗較少；

矯頑力較低)，其中以最後一種的磁性最好。因此磁放大器採用這些鋼片，比之採用上述的變壓器鋼片更為適宜，這些鋼片也屬於第一大类。可惜 $B\Pi$ 號鋼比普通的變壓器鋼稍為硬一些和脆一些，所以採用這類鋼片時會引起很高的壓模損耗。

普通的 $\partial 3 \cdots \partial 44A$ 型變壓器鋼以及 $B\Pi$ 型鋼都系製成厚度為 $0.5, 0.35$ 和 0.3 毫米的薄片，所以只能在低聲頻的範圍內（大約在 1000 赫以下）使用。如果頻率較高，則因產生渦流，而使有效導磁率的最大值減低得很厲害，使磁放大器的特性變壞。所以頻率更高時，則採用 $B\Pi-1$ 、 $B\Pi-2$ 、 $T\Pi-1$ 和 $T\Pi-2$ 型鋼，這類鋼製成厚度為 0.2 毫米和 0.1 毫米的薄片，它的磁性大致與 $B\Pi$ 型鋼一樣。

我們工廠生產的 $XB\Pi$ 型和 $XT-18$ 型的高導磁率冷軋鋼，在第一类的全部磁性材料中，要算它的磁性是最高的。 $XB\Pi$ 型和 $XT-18$ 型鋼，沿鋼材軋制方向的磁性很高。因此如用這種鋼材做鐵心，鐵心構造應設計得使磁力綫通過整個鐵心時都能沿鋼材的軋制方向通過。假如依阿基米德螺旋綫形狀卷成環形或 O 形的帶狀鐵心，這一點是可以做到的。採用 $XB\Pi$ 型或 $XT-18$ 型的冷軋鋼，能够使大功率磁放大器的重量和尺寸比之用 $\partial 44$ 或 $\partial 44A$ 型的最好變壓器鋼做成的放大器要減少 $30-50\%$ 。可以將 $XB\Pi$ 型的鋼製成帶形，厚度薄到 0.03 毫米。

幾種第一类磁性材料的特性在表 1 中列出。

第一类的磁性材料主要是用於功率磁放大器，放大器的功率大約在 $5-10$ 瓦以上。至於功率較小的放大器，它的鐵心則常使用第二类的磁性材料，第二类的磁性材料是鐵鎳合金，